



TITLE:

# Orientation Dependence of Hardening and Microstructural Evolution in Ion-irradiated Tungsten Single Crystal( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Eva, Hasenhuettl

---

CITATION:

Eva, Hasenhuettl. Orientation Dependence of Hardening and Microstructural Evolution in Ion-irradiated Tungsten Single Crystal. 京都大学, 2017, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20484>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-03-20に公開; 許諾条件により要旨は2018-03-20に公開

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Eva HASENHUETL
論文題目	Orientation Dependence of Hardening and Microstructural Evolution in Ion-irradiated Tungsten Single Crystal (タングステン単結晶におけるイオン照射硬化および微細組織発達の方位依存性)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、タングステン (W) 単結晶におけるイオン照射硬化および微細組織発達の方位依存性を論じた結果をまとめたもので、8 章からなっている。			
第 1 章は序論で、W は核融合炉ダイバータのプラズマ対向材料の第一候補材であり、W の照射損傷に関する研究が重要であることが述べられている。特に、W は脆性的な振舞を示すため、高エネルギー中性子による照射脆化が懸念されているが、W の照射影響については不明な点が残されていると指摘している。			
第 2 章では、W の照射影響に関する従来の研究を調査し、W におけるイオン照射の影響が W の結晶粒度に依存し、照射硬化機構の理解が統一されていないため、W の単結晶を用いた研究が必要であると述べている。			
第 3 章では、結晶方位を揃えた試料の作製、DuET を用いた実験手順、ナノインデンテーション法 (NI)、さらに原子間力顕微鏡 (AFM) と透過型電子顕微鏡 (TEM) 等、本研究の遂行に必要な実験方法が述べられている。			
第 4 章は、NI 硬さのひずみ速度感受性に関するもので、イオン照射した W 単結晶の NI 硬さのひずみ速度感受性に及ぼすイオン照射の影響を調べた結果、ひずみ速度感受性は、照射によりやや減少するが、転位運動の活性化体積はほとんど変化しないことを明らかにし、イオン照射により形成された損傷組織は、非熱活性的な転位運動障害であると結論した。			
第 5 章では、NI 硬さの評価における pile-up 現象の重要性に着目し、まず、NI 硬さ測定における圧痕周辺の pile-up 現象および試験材料と NI チップの双方の弾性率を考慮した評価が必要であることを指摘している。次に、照射により pile-up 高さが増大し、{001}W 単結晶の照射硬化量は、pile-up 現象を考慮しない場合に比べて顕著に低下し、損傷量の増大に伴ってその差が減少することを示している。			
第 6 章は、NI 硬さの照射影響における結晶方位依存性について述べたもので、{011}W および{001}W 単結晶にイオン照射 (1 dpa) を行い、NI 硬さの深さ方向の分布を調べた。その結果、NI 硬さ分布に明瞭な結晶方位依存性がみられ、{011}W に比べ、{001}W において照射硬化がより深部に到達していることが示されている。一方、TEM 観察からは、損傷組織は照射方向に垂直な二本のバンドを成すように形成されることが初めて見出された。すなわち、表面に近い方のバンドは損傷量のピーク位置とほぼ重なっており、深い方のバンドは注入イオンのピーク位置に相当することを示している。また、損傷組織の分布に顕著な方位依存性がみられないとしている。			
第 7 章では、この結晶方位依存性に及ぼす損傷量 (0.1、1、2 dpa) の影響を調べ、NI 硬さ分布の方位依存性は、損傷量の影響をほとんど受けないことを示した。一方、高分解能 TEM を用いて照射損傷組織の分布を詳細に観察した結果、照射量の低い場合 (0.1、1 dpa) は損傷			

組織形成に方位依存性はみられないが、高照射量（2 dpa）下での照射損傷組織の分布は、 $\{001\}$ W においては SRIM code 計算値に比べ 2 倍以上の深さにまで広がっているのに対し、 $\{011\}$ W においてはほぼ計算値と一致していることを見出している。さらに、これらの照射硬化挙動における結晶方位依存性に関しては、従来から指摘されている微小な格子間型転位ループの $\langle 111 \rangle$ 方位に沿った一次元運動に着目し、 $\{001\}$ 照射面方位は $\{011\}$ 照射面方位に比べ、試料の深部に向かう $\langle 111 \rangle$ 方位バリエーションの数が 2 倍であることを明らかにし、より深部に一次元運動することの可能な  $a/2\langle 111 \rangle$ バーガースベクトルを持つ格子間型転位ループの数密度の相違が NI 硬さ分布の方位依存性の原因であると結論している。

第 8 章は、まとめと結論である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、加速器を用いてイオン照射した純タングステン (W) 単結晶における照射硬化および損傷組織形成挙動の結晶方位依存性について研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

まず、イオン照射した W 単結晶を用いて、ナノインデンテーション (NI) 硬さのひずみ速度感受性に及ぼすイオン照射の影響を調べた結果、ひずみ速度感受性は照射によりやや減少することを示し、イオン照射により形成された損傷組織は非熱活性的な転位運動障害であると結論した。また、NI 硬さの評価においては圧痕周辺の **pile-up** 現象および試験材料と NI チップの双方の弾性率を考慮する必要があること、ならびに照射により **pile-up** 高さが増大し、 $\{001\}$ W 単結晶においては、**pile-up** 現象を考慮した場合の照射硬化量が考慮しない場合の約 1/2 になることを示している。

次に、 $\{011\}$ W および  $\{001\}$ W 単結晶に異なる損傷量 (0.1、1、2 dpa) のイオン照射を行い、NI 硬さの深さ方向の分布を調べた結果、NI 硬さ分布が結晶方位に依存することを見出した。すなわち、 $\{011\}$ W に比べ、 $\{001\}$ W において照射硬化がより深い領域に到達していること、ならびにこの NI 硬さ分布の方位依存性は、損傷量の影響をほとんど受けないことを明らかにしている。一方、高分解能透過電子顕微鏡を用いて照射損傷組織の分布を詳細に観察した結果、照射量の低い場合は損傷組織形成に方位依存性はみられないが、高照射量では方位依存性が存在することを見出している。すなわち、 $\{001\}$ W においては損傷領域が SRIM code 計算値に比べ 2 倍以上の深さにまで到達しているのに対し、 $\{011\}$ W においてはほぼ計算値と一致していることを明らかにした。これらの照射硬化挙動における方位依存性の発現機構の考察では、微小な格子間型転位ループの  $\langle 111 \rangle$  方位に沿った一次元運動に着目し、 $\{001\}$ 照射面方位は  $\{011\}$ 照射面方位に比べ、試料の深い領域に向かう  $\langle 111 \rangle$  方位バリエーションの数が 2 倍であることを示し、より深い領域に一次元運動することの可能な転位ループの数密度の相違が NI 硬さ分布の方位依存性の原因であると結論している。

以上、本論文は、W 単結晶におけるイオン照射硬化挙動の結晶方位依存性を明らかにし、W の照射影響評価に関する重要な基礎的知見を与えており、それらは核融合炉 W ダイバータの設計や補修技術開発において寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 2 月 21 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：2018 年 3 月 20 日以降